

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

VOLUMEN 10

México, D. F., 1o. de Abril de 1970

NÚMERO 2

SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE LA REGIÓN NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO.¹ RESULTADOS PRELIMINARES

CINNA LOMNITZ,² FEDERICO MOOSER,³
CLARENCE R. ALLEN,⁴ JAMES N. BRUNE,⁵
y WAYNE THATCHER⁴

RESUMEN

Se establecieron tres estaciones sismográficas nuevas, en la región norte del Golfo de California en México. Durante un periodo representativo, en abril y mayo de 1969, la sismicidad estuvo concentrada en las fallas de Imperial, San Jacinto, Sierra Juárez y San Miguel, y la dispersión de epicentros fue mucho menor de lo que se conocía previamente. Un importante enjambre de temblores ocurrió en marzo de 1969, cerca de la Roca Consag en el norte del Golfo, cuyo estudio ha contribuido al conocimiento de la tectónica regional. En el norte del Golfo de California y en la depresión de Salton adyacente, podemos aproximar la estructura tectónica por una serie de seis fallas transformadas, conectadas con cinco centros de dispersión (segmentos de cresta) caracterizados por zonas geotérmicas activas, volcanes recientes, enjambres de temblores y depresiones topográficas submarinas. Las complejidades en el patrón de fallas pueden relacionarse con una disminución de la velocidad de dispersión en los segmentos de cresta hacia el norte. Se encuentran en construcción cinco nuevas estaciones sismológicas de alta calidad, en torno al Golfo de California, cuyo objeto es una comprensión más detallada del patrón de dispersión del fondo submarino en esta región de excepcional importancia.

¹ Contribución conjunta de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) (Instituto de Geofísica, Contribución No. 1042), el Instituto Tecnológico de California (División de Ciencias Geológicas, Contribución No. 1948) y la Universidad de California, San Diego (Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Contribución No. ...)

² Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

³ Sección de Geología, Comisión Federal de Electricidad, México.

⁴ Laboratorio Sismológico, Instituto Tecnológico de California, Pasadena.

⁵ Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Universidad de California, San Diego.

SEISMICITY AND TECTONICS OF THE NORTHERN GULF OF CALIFORNIA REGION, MEXICO.¹ PRELIMINARY RESULTS

CINNA LOMNITZ,² FEDERICO MOOSER,³
CLARENCE R. ALLEN,⁴ JAMES N. BRUNE,⁵
and WAYNE THATCHER⁴

ABSTRACT

Three new seismographic stations have been established in the northern Gulf of California region, Mexico. Seismicity during a representative period in April and May of 1969 was concentrated on the Imperial, San Jacinto, Sierra Juárez, and San Miguel faults, and the spread of epicentral locations was much less than had previously been indicated. An intense earthquake swarm in March of 1969 occurred near Consag Rock in the northern Gulf, and its study contributes to our understanding of the regional tectonics. In the northern Gulf of California and adjacent Salton trough, the tectonic framework may be approximated by a series of six transform faults connected by five spreading centers (ridge segments) evidenced by geothermal areas, recent volcanic activity, earthquake swarms, and submarine topographic depressions. Complexities in the fault pattern may be related to a northward decrease in spreading rates along the ridge segments. Five new high-quality seismographic stations around the Gulf of California are now under construction in order to understand in more detail the pattern of sea-floor spreading in this unique and important region.

¹ A joint contribution of the Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) (Institute of Geophysics Contribution No. 1042), the California Institute of Technology (Division of Geological Sciences Contribution No. 1948), and the University of California, San Diego (Institute of Geophysics and Planetary Physics Contribution No. ...)

² Institute of Geophysics, U.N.A.M.

³ Geological Section, Federal Commission of Electricity, Mexico.

⁴ Seismological Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.

⁵ Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, San Diego.

INTRODUCCIÓN

La revolución reciente en nuestros conocimientos de tectónica en que juega gran papel la dispersión del fondo submarino, indica que el Golfo de California es una de las regiones más importantes en el estudio del mecanismo y características del proceso de dispersión del fondo submarino. Además se sabe que la estructura tectónica del Golfo de California está íntimamente relacionada con la estructura tectónica de California y del sistema de la falla de San Andrés, y que el conocimiento de la tectónica del Golfo es crítico para comprender y predecir el comportamiento futuro de la falla de San Andrés. Los movimientos asociados con la apertura del Golfo se transforman directamente en la ocurrencia de temblores importantes sobre el sistema de San Andrés; es importante comprender este proceso debido al riesgo sísmico potencial, especialmente en el extremo norte del Golfo, donde existe un crecimiento rápido industrial y de población a ambos lados de la frontera internacional.

En este trabajo informaremos acerca de los resultados preliminares de un estudio de la sismicidad y tectónica de la región norte del Golfo de California, incluyendo la depresión de Salton y el delta del río Colorado. Estos resultados se obtuvieron parcialmente en base a los datos de tres estaciones sismológicas nuevas, que se establecieron en 1969, como estaciones experimentales para una red más extensa que proponemos instalar dentro de los próximos dos años. El establecimiento de estas estaciones fue posible gracias a un acuerdo conjunto de enero de 1969 entre los investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Instituto Tecnológico de California, junto con la cooperación activa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Mexicali y del Departamento de Geología de la misma Comisión en México. Algunos resultados ya han sido presentados en el Congreso de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica en mayo de 1969 (Brune y Lomnitz), y en la Reunión 1969, de la American Geophysical Union, en Washington (Thatcher y Brune, 1969).

ESTACIONES

Los datos pertinentes a las tres nuevas estaciones sismológicas en Baja California Norte, se dan en la Tabla I y su ubicación se señala en la Fig. 1. Las localidades fueron seleccionadas mediante pruebas de ruido sísmico local y de recepción radial en 60 Kc, usando instrumentos portátiles. Las estaciones son atendidas con la cooperación técnica de la CFE en Mexicali y los registros se cambian diariamente para su procesamiento, en Pasadena, California. El análisis de datos se está llevando a cabo en el Instituto de Geofísica de la UNAM, el Laboratorio Sismológico del Instituto Tecnológico de California y el Instituto de Geofísica y Física Planetaria del Instituto Scripps de Oceanografía, en la Jolla, California.

SISMICIDAD EN LA REGIÓN DEL DELTA

Las nuevas estaciones de Baja California, y noablemente la estación Río Hardy (RHM) de alta sensibilidad, nos permitieron hacer localizaciones precisas de muchos epicentros en la región del delta del río Colorado, una región de alta sismicidad con escaso control epicentral previo. El mapa adjunto (Fig. 1), muestra la ubicación de las tres nuevas estaciones en relación a las estaciones meridionales de la red Caltech en Barrett (BAR) y Glamis

INTRODUCTION

The recent revolution in our knowledge of tectonics, in which ocean-floor spreading plays a major role, has pointed to the Gulf of California as one of the most important areas for study to determine the mechanism and characteristics of the ocean-floor-spreading process. Furthermore, it is now clear that the tectonic history of the Gulf of California is intimately related to the tectonic history of California and the San Andreas fault system, and that understanding of the tectonics of the Gulf is critical to understanding and predicting the future behavior of the San Andreas fault. The motion associated with the opening of the Gulf is directly translated into the occurrence of major earthquakes on the San Andreas fault system. An understanding of this process is important because of the potential earthquake hazard, particularly at the north end of the Gulf where rapid industrialization and population growth are occurring on both sides of the international border.

In this paper, we report preliminary results of a study of the seismicity and tectonics of the Northern Gulf of California region which includes the Salton trough and Colorado River delta areas. These results were obtained in part from three new seismograph stations established in 1969 as trial stations of a more extensive network we propose to install within the next two years. A joint agreement reached in January, 1969, between scientists of the Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) and the California Institute of Technology, coupled with the active cooperation of the Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) in Mexicali and the Department of Geology of the Comisión in Mexico City, made it possible to establish these seismographic stations. Some of the results have been presented at the meeting of the International Union of Geodesy and Geophysics in Madrid (Brune and Lomnitz, 1969) and at the 1969 meeting of the American Geophysical Union in Washington, D. C. (Thatcher and Brune, 1969).

STATIONS

Pertinent data for the three newly established seismographic stations in northern Baja California are given in Table I, and their locations are shown in Fig. 1. These localities were chosen after trial runs using portable backpack instruments to test local ground noise and 60 Kc radio reception. The stations are operated with the technical cooperation of the C.F.E. in Mexicali, and the records are changed daily for processing in Pasadena, California. Data analysis is carried out at the Instituto de Geofísica of the U.N.A.M., at the Seismological Laboratory of the California Institute of Technology, and at the Institute of Geophysics and Planetary Physics, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California.

SEISMICITY OF THE DELTA REGION

The newly established stations in Baja California, and particularly the very sensitive Río Hardy station (RHM), have enabled us to locate accurately many epicenters in the Colorado River delta region — an area of very high seismicity with little previous epicentral control. The attached map (Fig. 1) shows the location of the three new stations in relation to the southernmost existing stations of the Caltech network at Barrett (BAR) and Glamis

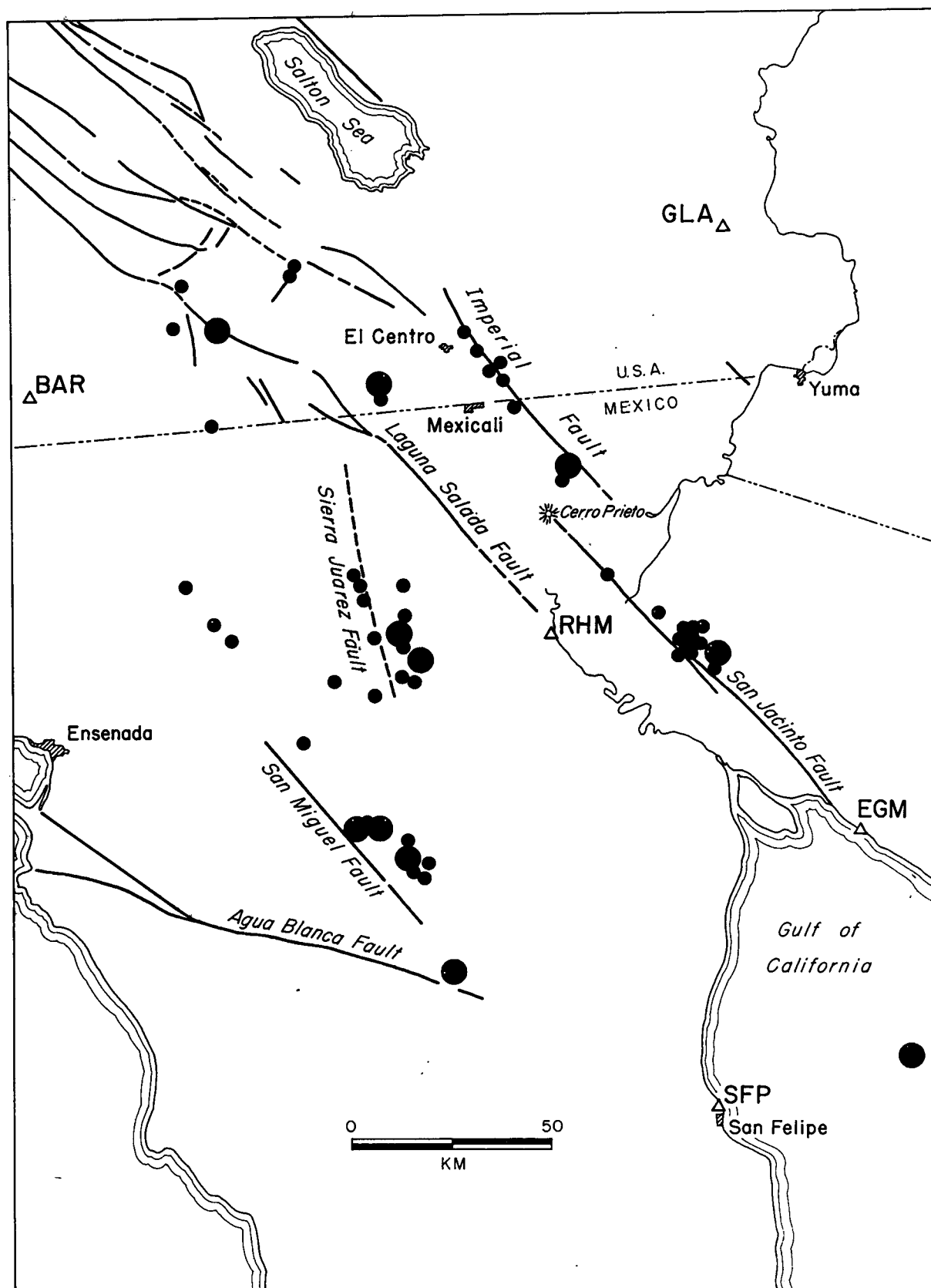


Fig. 1. Mapa que muestra las estaciones sismográficas recientemente establecidas en la parte norte de Baja California, México (RHM, EGM, SFP) y las estaciones de la red de Caltech en la parte sur de California (BAR, GLA). Los círculos son epicentros de los temblores que ocurrieron durante abril y mayo de 1969 (datos incompletos al norte de El Centro o al sur de San Felipe.)

Fig. 1. Map showing newly established seismographic stations in northern Baja California Mexico (RHM, EGM, SFP) and southernmost stations of Caltech network in southern California (BAR, GLA). Circles are epicenters of earthquakes that occurred during April and May of 1969. (Data not complete north of El Centro or south of San Felipe.)

(GLA). Utilizando los datos de estaciones a ambos lados de la frontera internacional en forma cooperativa, hemos podido lograr una precisión mucho mayor, en las localizaciones de temblores en esta región crítica, de lo que había sido posible hasta la fecha.

La Falla de San Jacinto es probablemente la componente más importante del sistema de San Andrés en la región del delta. Se extiende desde la costa del noroeste del Golfo en la localidad de "El Golfo" hasta Cerro Prieto, un cono volcánico cuaternario a 32 Km al sur de Mexicali que se encuentra junto al campo geotérmico, desarrollado actualmente, por la CFE. Como este campo geotérmico está sobre la Falla de San Jacinto, su sismicidad es de particular interés. Durante los meses de abril y mayo de 1969 un foco de actividad sísmica fue localizado en la Falla de San Jacinto cerca de Médanos, 50 Km al sureste de Cerro Prieto, y en la Falla paralela de Imperial también se localizó una actividad a 14 Km del noreste de Cerro Prieto y por la traza de la Falla hacia el noroeste (Fig. 1).

Esto es en particular interesante a la luz del proceso de dispersión del fondo submarino propuesto; posiblemente Cerro Prieto yace sobre una cresta conectada con las Fallas Imperial y San Jacinto —una hipótesis que además se sostiene por el hecho de que la evidencia geológica de desplazamiento Reciente cesa al noroeste de Cerro Prieto (en dirección a la Falla de San Jacinto) y al sureste de un punto de la Falla Imperial enfrente de Cerro Prieto. En todo caso, los datos de las nuevas estaciones —y RHM en particular— demuestran que ambas fallas (la Imperial y la de San Jacinto) están actualmente activas en el delta del río Colorado a muy corta distancia de Cerro Prieto. Además, los epicentros se localizan mucho mejor sobre las dos fallas que lo que se había pensado hasta la fecha.

Durante abril y mayo de 1969, los temblores parecían localizados sobre otras dos fallas en la parte norte de Baja California. La falla en la base de la Sierra Juárez, a 55 Km al suroeste de Cerro Prieto, mostró actividad considerable, como también la Falla de San Miguel más al suroeste. Un estudio especial usando instrumentos portátiles en la Falla de la Sierra Juárez cerca del Cañón de Guadalupe (zona hidrotermal) mostró una elevada actividad de micro-temblores durante una parte de este mismo periodo. Por otro lado, hubo una falta sorprendente de actividad durante este periodo en algunas de las otras fallas importantes de la región con desplazamientos cuaternarios, tales como la Falla de Laguna Salada.

ENJAMBRE SÍSMICO EN LA PARTE NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA

En base a Río Hardy y a las estaciones portátiles de San Felipe y el Golfo que se establecieron allí antes que las instalaciones permanentes, fue posible hacer un estudio intensivo del enjambre de temblores que causó daños leves en el área del delta del río Colorado después del 20 de marzo de 1969. Estos temblores tuvieron su epicentro cerca de $31^{\circ} 10' N.$, $114^{\circ} 25' W.$, cerca de la Roca Consag en la parte norte del Golfo (Fig. 2). La Tabla II nos da una idea de la magnitud de la actividad de temblores asociada con este enjambre. Se ha estudiado con gran detalle (Thatcher y Brune, en prensa) a causa de su potencial importancia para entender el origen y el mecanismo de fallas en esta región.

(GLA). By cooperatively using data from the stations on both sides of the international border, far greater accuracy has been achieved in locating earthquakes in this critical region than has ever been possible before.

The San Jacinto fault is probably the most important member of the San Andreas system in the delta region. It extends northwest from the shore of the Gulf at El Golfo at least as far as Cerro Prieto — a Quaternary volcanic cone located 32 Km south of Mexicali and adjacent to the Cerro Prieto geothermal field, currently under extensive development by the C.F.E. Inasmuch as the geothermal field lies on the San Jacinto fault, its seismicity is of special interest. During April and May of 1969 a "hot spot" of seismic activity was located along the San Jacinto fault near Médanos, 50 Km southeast of Cerro Prieto, and the parallel Imperial fault also showed localized activity 14 Km northeast of Cerro Prieto and along the fault trace to the northwest (Fig. 1).

This is particularly intriguing in the light of the proposed ocean-floor-spreading process; possibly Cerro Prieto lies on a ridge segment connecting the transform Imperial and San Jacinto faults —a hypothesis that is further supported by the fact that geological evidence of Recent displacement ceases northwest of Cerro Prieto (on the San Jacinto fault trend) and southeast of a point on the Imperial fault opposite Cerro Prieto. In any event, data from the new stations —and RHM in particular— prove that both the Imperial and San Jacinto faults are presently active in the Colorado River delta at short range from Cerro Prieto. Furthermore, epicenters are much more localized along the two faults than had heretofore been thought.

During April and May of 1969, earthquakes appear to have been localized along two other faults in northern Baja California. The fault at the base of the Sierra Juárez, 55 Km southwest of Cerro Prieto, showed considerable activity, as did the San Miguel fault still farther southwest. A special study using portable back-pack instruments along the Sierra Juárez fault near Cañón de Guadalupe (a known hot-spring area) showed exceptionally high micro-earthquake activity during part of this same period. On the other hand, there was a surprising absence of activity during this period along some of the other major faults of the region with abundant evidence of Quaternary displacements, such as the Laguna Salada fault.

SEISMIC SWARM IN THE NORTHERN GULF OF CALIFORNIA

On the basis of data from Río Hardy and from portable stations at San Felipe and El Golfo established prior to the permanent installations there, it was possible to make an intensive study of the earthquake swarm which caused light damage in the Colorado River delta area on and after 20 March 1969. These earthquakes had epicenters near $31^{\circ} 10' N.$, $114^{\circ} 25' W.$, close to Consag Rock in the northern Gulf (Fig. 2). Table II gives an idea of the magnitude of earthquake activity associated with this swarm. It has been studied in great detail (Thatcher and Brune, in press) because of its potential importance for understanding the origin and mechanism of faulting in this region.

TABLA I

DATOS DE LAS ESTACIONES EN LA PARTE
NORTE DE BAJA CALIFORNIA

Clave Code	Coordenadas Coordinates		Elev.	Inst.
	Latitud Latitude	Longitud Longitude		
RHM Río Hardy	32°08.5'	115°17.0'	20 m	Vertical Baby Benioff
SFP San Felipe	31°01.9'	114°49.8'	4 m	Vertical Baby Benioff 2 periodos largos horizontales especiales 2 long- period horizontals special-
EGM El Golfo	31°40.7'	114°29.5'	5 m	Vertical Baby Benioff 2 periodos largos horizontales especiales 2 long- period horizontals special

TABLE I

DATA FOR NORTHERN BAJA CALIFORNIA
STATIONS

Formación Geológica	Fecha
Geologic Formation	Date
Roca meta- sedimentaria	Febrero 16, 1969
Meta- sedimentary	February 16, 1969
Roca meta- sedimentaria	Abril 26, 1969
Meta- sedimentary rocks	April 26, 1969
Gravas Cuaternarias	Abril 26, 1969
Quaternary Gravels	April 26, 1969

TABLA II

MAGNITUDES Y NÚMERO DE TEMBLORES EN LA PARTE NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA, 20-28 MARZO 1969.

<i>Magnitud</i> <i>Richter Magnitude</i>	<i>Número</i> <i>Number</i>
5.75 a 6.00	1
5.50 a 5.75	7
5.25 a 5.50	7
5.00 a 5.25	24
4.75 a 5.00	32
4.50 a 4.75	39
4.25 a 4.50	46
4.00 a 4.25	40
Total mayor de 4.00	196
Total greater than 4.00	

TABLE II

MAGNITUDES AND NUMBERS OF EARTHQUAKES IN NORTHERN GULF OF CALIFORNIA EARTHQUAKE SWARM, 20-28 MARCH 1969.

La actividad durante este enjambre fue similar al de una secuencia de réplicas, pero con el temblor principal compuesto por más de 70 eventos con magnitudes entre 4 y 5.5 que ocurrieron durante un periodo de 6 horas después que la actividad del enjambre se inició. El total de actividad cumulativa durante este periodo correspondía a un solo temblor de magnitud 6.2. Los datos de tiempos de recorrido indican que todos los eventos estuvieron localizados dentro de un diámetro de 5-10 Km, y los hipocentros estuvieron en la corteza superior. Los esfuerzos aparentes para todos los eventos son muy similares, no muestran un patrón consistente como una función del tiempo, y son similares a los valores para otras crestas (Wyss, 1970).

Las soluciones de los mecanismos focales muestran una importante componente de falla normal durante este enjambre, lo que es típico de los temblores en las crestas oceánicas (Sykes, 1970) pero en marcado contraste a las fallas usuales transcurrentes tales como la Falla de San Andrés y otras fallas transformadas más al sur del Golfo (Sykes, 1968). Enjambres similares de actividad sísmica han ocurrido en esta misma área en años recientes, y también en la Cuenca del Delfín a 150 Km al sur. La información sismológica y batimétrica conjuntamente indican un patrón de dispersión del fondo submarino (fallas transformadas y segmentos de cresta) como indica la Fig. 2. Además, Thatcher y Brune (en prensa) sugieren un acoplamiento mecánico de los procesos tectónicos en las cuencas de Wagner y Delfín.

PATRÓN TECTÓNICO

Es evidente que el patrón tectónico en la parte norte del Golfo de California y a través de Salton tiene muchos rasgos de un simple sistema de fallas transformadas conectadas con segmentos de cresta (Fig. 3). En especial al noreste de la cuenca, la mayoría de las fallas transformadas son rectas pero terminan repentinamente sin evidencias geológicas ni sísmicas de continuidad, en regiones que pueden identificarse como centros de disper-

Activity during this swarm was similar to that of a fore-shock-mainshock-aftershock sequence, but with the "main-shock" composed of more than 70 events with magnitudes between 4 and 5.5 that occurred during one six-hour period about a day after the swarm activity was initiated. The total cumulative activity during this period corresponded to about a single magnitude 6.2 earthquake. Near-source travel-time data indicate that all sources were located within 5-10 Km of one another, and hypocenters were confined to the upper crust. Apparent average stresses for all the events are very similar, show no consistent pattern as a function of time, and are close to values obtained from other ridges (Wyss, 1970).

Focal mechanism solutions show a large component of normal faulting during this swarm, which is typical of earthquakes on oceanic ridges (Sykes, 1970) but is in marked contrast to the usual strike-slip faulting along transform faults such as the San Andreas fault itself and other transform faults farther south of the Gulf (Sykes, 1968). Similar swarms of activity have occurred in this same area in recent years, and also in the Delfin basin about 150 Km to the south. The seismological and bathymetric information taken together suggest a pattern of ocean-floor spreading (transform faults and ridge segments) as indicated in Fig. 2. Furthermore, mechanical coupling of tectonic processes in the Wagner basin and Delfin basin is suggested by Thatcher and Brune (in press).

TECTONIC PATTERN

It is clear that the tectonic pattern of the northern Gulf of California and Salton trough has many of the features of a simple system of transform faults connected by ridge segments (Fig. 3). Particularly on the northeast side of the trough, most of the transform faults are straight but end abruptly with neither geologic nor seismic evidence of continuation, at regions which may be inferred to be spreading centers (i.e., ridge segments). Evidence for the

sión (o sea, segmentos de cresta). La evidencia para los centros de dispersión incluye: campos de vapor geotérmico (Salton Buttes y Cerro Prieto), actividad volcánica reciente (Salton Buttes, Cerro Prieto y Roca Consag), enjambres de temblores (cerca de Salton Buttes, y en las cuencas de Wagner y Delfín), y depresiones topográficas (cuencas de Wagner y Delfín). En este patrón, el cono volcánico de Cerro Prieto y los campos de vapor aparecen cerca de la intersección de una falla transformada con un segmento de cresta, y otras áreas geotérmicas podrían esperarse en un ambiente tectónico similar. Otras zonas

spreading centers includes geothermal steam fields (Salton Buttes and Cerro Prieto), young volcanic activity (Salton Buttes, Cerro Prieto, Consag Rock), the occurrence of earthquake swarms (near Salton Buttes, Wagner basin, Delfin basin), and topographic depressions (Wagner basin, Delfin basin). In this idealized pattern, the Cerro Prieto volcanic cone and steam fields appear near the intersection of a transform fault with a ridge segment, and other geothermal areas might be expected in similar tectonic environments. Locations of other isolated areas of

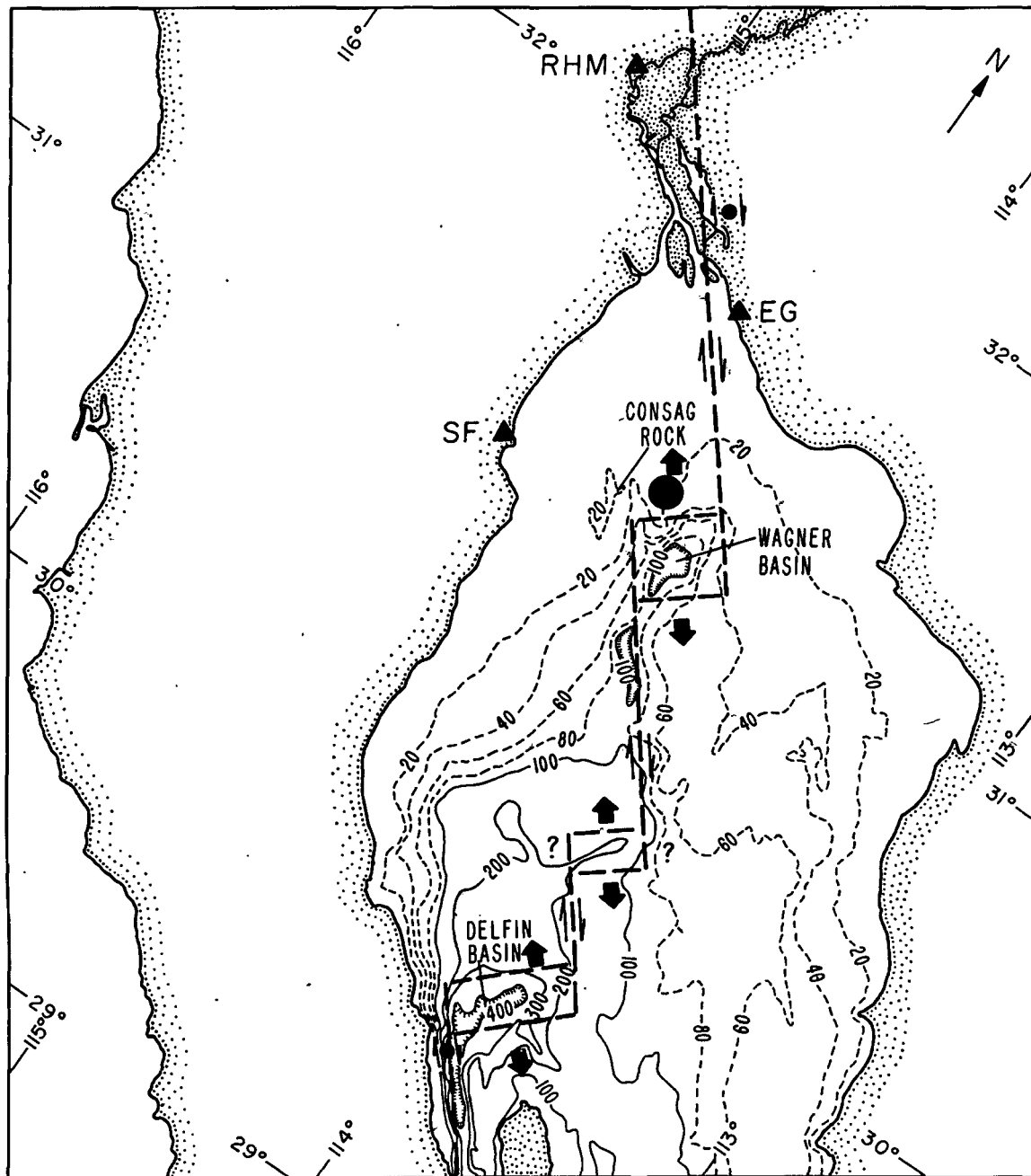


Fig. 2. Mapa batimétrico de la parte norte del Golfo de California, modificado según Fisher y otros (1964). Se indica un sistema postulado de fallas transformadas y centros de dispersión (segmentos de cresta). Las estaciones sismográficas locales (triángulos) y la mejor localización del enjambre de 1969 (círculo grande) se indican, y asimismo, dos mecanismos focales de Sykes (1968); según Thatcher y Brune (en prensa).

Fig. 2. Bathymetric map of the northern Gulf of California, modified from Fisher et al. (1964). A postulated system of transform faults and spreading centers (ridge segments) is indicated. Local seismographic stations (triangles) and the best location of the 1969 swarm (large circle) are shown, along with two focal mechanisms by Sykes (1968) from Thatcher and Brune (in press).

aisladas de elevado flujo de calor en el Valle del Imperial han sido usadas por Elders y otros (1970) para postular un patrón de dispersión un poco más complicado que el de la Fig. 3.

Aunque el sistema idealizado de fallas transformadas y crestas en las Figuras 2 y 3 pueden representar una buena aproximación de la estructura tectónica de la cuenca de Salton y de la parte norte del Golfo de California, no se explica la abundante actividad sísmica al oeste de la cuenca en esta región (Allen y otros, 1965) ni las numerosas fallas activas que continúan al noroeste de las fallas transformadas en la cuenca, las cuales en el patrón idealizado no deberían presentarse. Los ejemplos son numerosos en la parte norte de Baja California y en la parte sur de California: Agua Blanca, San Miguel, Laguna Salada, Elsinore, y la Falla de San Jacinto al este del Lago Salton. Todas estas fallas laterales-derechas son activas y divergen hacia el oeste del eje de la parte norte del Golfo y de la cuenca Salton; no hay sistema análogo al este.

high heat flow in the Imperial Valley have been used by Elders et al. (1970) to infer a spreading pattern somewhat more complicated than that of Fig. 3.

Although the idealized transform fault and ridge system of Figs. 2 and 3 appears to be a fair approximation of the tectonic framework of the Salton trough and northern Gulf of California, it does not explain the abundant seismic activity west of the trough in this region (Allen et al., 1965) nor the numerous active faults which continue northwest from transform faults within the trough and which—in the idealized pattern—should not be present. Examples are numerous in northern Baja California and southern California: Agua Blanca, San Miguel, Laguna Salada, Elsinore and the San Jacinto fault zone east of the Salton Sea. All of these are active right-lateral faults which diverge westward from the axis of the northern Gulf and Salton trough; there is no analogous system to the east.

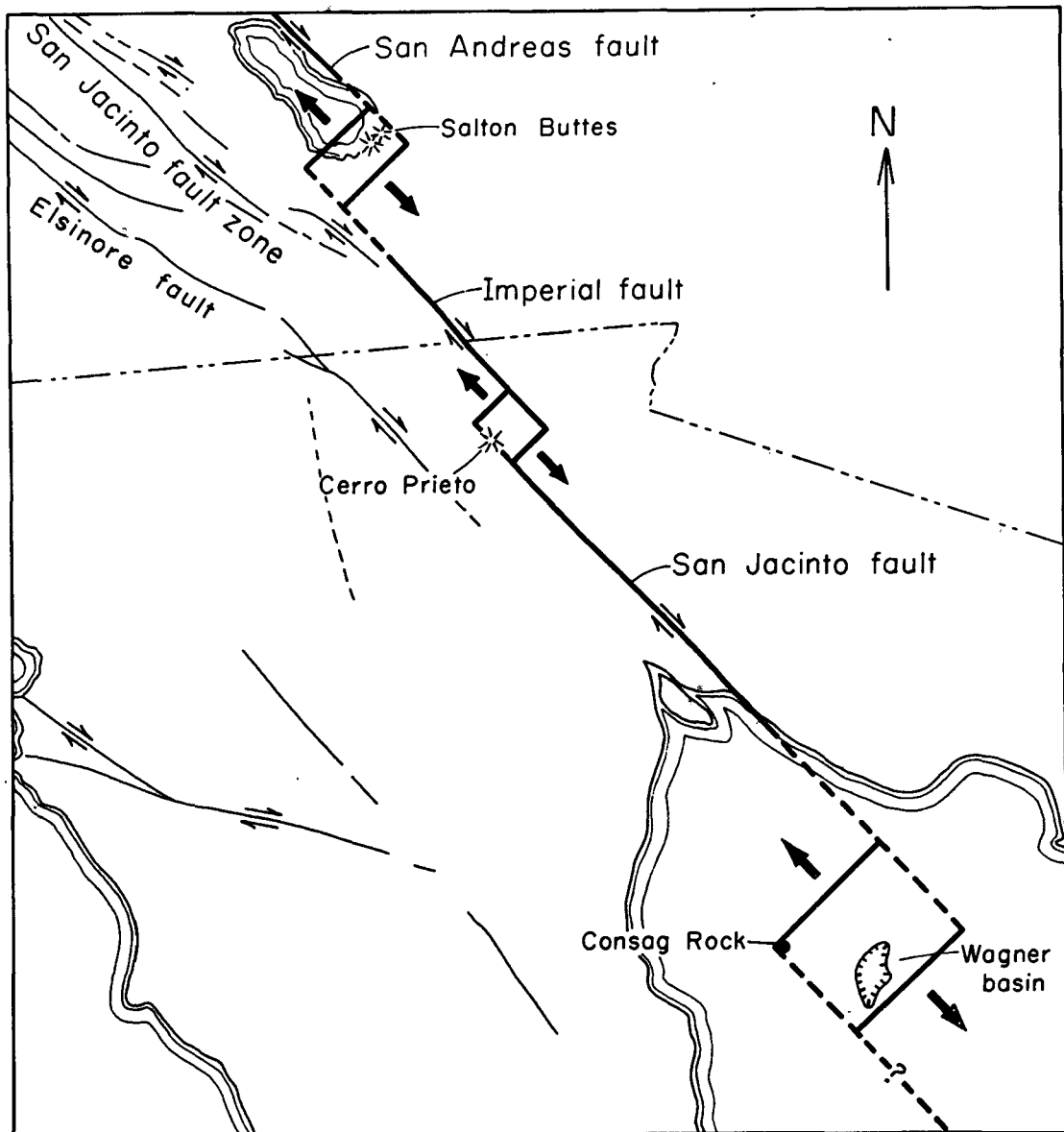


Fig. 3. Sistema idealizado de fallas transformadas y centros de dispersión en la región del delta del Río Colorado.

Fig. 3. Idealized system of transform faults and spreading centers in the Colorado River delta region.

Una explicación de las numerosas fallas activas que divergen al oeste del Golfo es que las velocidades actuales de dispersión en segmentos de cresta individuales disminuyen progresivamente hacia el norte, lo cual necesitaría un ajuste del tipo observado, según el esquema de la Fig. 4. En esta hipótesis, la velocidad de dispersión actual cerca de Cerro Prieto es posiblemente más elevada (pero no necesariamente más antigua) que en Salton Buttes, produciéndose una continuación de los rumbos hacia el noroeste, para las fallas laterales-derechas al oeste del Golfo (Figs. 3, 4). La razón de por qué la velocidad de dispersión decrecería hacia el norte no se conoce, pero tal vez este sea el resultado de la interferencia a los movimientos continuos de falla causados por las Transverse Ranges del sur de California. La Falla de San Andrés, por ejemplo, debe hacer una vuelta más pronunciada donde encuentra a las Transverse Ranges (al norte del área de la Fig. 3) que la zona de la Falla de San Jacinto al oeste; así tal vez se impida la dispersión en Salton Buttes a favor de una dispersión en Cerro Prieto, y ocasionando una actividad sísmica actual más elevada en la Falla de San Jacinto al oeste del Lago Salton que en la Falla de San Andrés más al este. La actividad sísmica e intrusiva en estos centros de dispersión puede, por supuesto, ser el resultado del desgarramiento de bloques antes que su causa.

Otra hipótesis puede ser que la abertura del Golfo empezó en su extremo sur y progresó hacia el norte. Así la dispersión total decrecería en dirección hacia el norte. Por ejemplo, si el centro de dispersión cerca de Salton Buttes es más reciente que el de Cerro Prieto, esto pudo producir una continuación de desplazamientos laterales-derechos hacia la prolongación noroeste de la Falla de Imperial, como se observa en las numerosas fallas subsidiarias activas de la Falla de San Jacinto al oeste del Lago Salton. Sin embargo, se opone a esta hipótesis el hecho que el desplazamiento total a la boca del Golfo puede ser del mismo monto que el de la Falla de San Andrés al noreste del Lago Salton en la parte sur de California; alrededor de 260 Km de desplazamiento han sido sugeridos para una y otra región (Crowell, 1962; Larson y otros, 1968). Además, el total de desplazamientos y las edades de los miembros individuales del sistema de San Andrés en el sur de California parece decrecer del noreste al suroeste: la Falla de San Andrés tiene alrededor de 260 Km de desplazamiento lateral-derecho (Crowell, 1962), la Falla de San Jacinto al oeste del Lago Salton tiene alrededor de 25 Km (Sharp, 1967) y los miembros de la zona de la Falla Elsinore tienen menos todavía (Gray, 1961; Sharp, 1968). Estas relaciones son difíciles de conciliar con un crecimiento hacia el norte del sistema.

RED SISMOGRÁFICA PROPUESTA

Un reciente contrato de la National Science Foundation de los Estados Unidos a la UNAM, el Instituto Tecnológico de California y la Universidad de California en San Diego, permitirá el establecimiento de 5 nuevas estaciones sismográficas de alta calidad en el Golfo de California y la modernización de la estación actual en Río Hardy. Provisionalmente, se proyecta situar las nuevas estaciones cerca de Caborca (Sonora), Bahía de los Angeles (Baja California), Guaymas (Sonora), Los Mochis (Sinaloa), y La Paz (Territorio de Baja California Sur). Los registros serán cambiados diariamente por el personal de la CFE. El equipo en cada estación incluirá un sismómetro y un registrador fotográfico, receptor de radio

An explanation for the numerous active faults diverging west from the Gulf is that the present-day spreading rates on individual ridge segments decrease progressively northward, which would necessitate adjustments of the type observed-shown schematically in Fig. 4. In this hypothesis, the present-day spreading rate near Cerro Prieto is visualized as being higher (but not necessarily older) than that at Salton Buttes; thus resulting in a continuation of northwesterly trending, right-lateral faults on the west side of the Gulf (Figs. 3, 4). Why the spreading rate should decrease northward is unknown, but it might be argued that this is the result of the interference to through-going fault movements caused by the Transverse Ranges of Southern California. The San Andreas Fault, for example, must make a much more abrupt bend where it meets the Transverse Ranges (just north of the area of Fig. 3) than does the San Jacinto fault zone to the west, thus perhaps impeding the spreading at Salton Buttes in favor of the spreading at Cerro Prieto, and thus leading to a higher current seismicity on the San Jacinto fault zone west of the Salton Sea than on the San Andreas fault to the east. The intrusive and seismic activity at these spreading centers may, of course, be the result of the pulling apart of various blocks rather than the cause of it.

Another hypothesis might be that the opening of the Gulf began at its southern end and progressed northward. Thus, the total amount of spreading would decrease in a northerly direction. For example, if the spreading center near Salton Buttes were more recent than near Cerro Prieto, this could result in a continuation of right-lateral displacements on the extended northwesterly trend of the Imperial Fault, as is observed on the numerous active branches of the San Jacinto fault zone west of the Salton Sea. Arguing against this hypothesis, however, is the fact that the total displacement at the mouth of the Gulf may be of about the same amount as that along the San Andreas fault northeast of the Salton Sea in southern California. About 260 Km of displacement has been suggested for both areas (Crowell, 1962; Larson, et al., 1968). Furthermore, the total displacement and age of individual members of the San Andreas system in southern California appear to decrease from northeast to southwest: the San Andreas fault itself has about 260 Km of right-lateral displacement (Crowell, 1962), the San Jacinto fault west of the Salton Sea has about 25 Km (Sharp, 1967), and the various members of the Elsinore fault zone have still less (Gray, 1961; Sharp, 1968). These relationships are difficult to rationalize with northward growth of the system.

PROPOSED SEISMOGRAPHIC NETWORK

A recent grant from the U.S. National Science Foundation to the U.N.A.M., the California Institute of Technology and the University of California at San Diego will permit the establishment of five new high-quality seismographic stations around the Gulf of California and the modernization of the present station at Río Hardy. Tentatively, it is planned to locate the new stations near Caborca (Sonora), Bahía de Los Angeles (Baja California), Guaymas (Sonora), Los Mochis (Sinaloa), and La Paz (Territorio Baja California Sur). Records will be changed daily by personnel of the C.F.E. Equipment at each station will include a seismometer and photographic recorder, 60 Kc radio (for time signals) and crystal clock system

en 60 Kc (para señales de tiempo) y un sistema de reloj de cristal con panel solar y batería. Estas unidades están en construcción por el Instituto Tecnológico de California; serán instalados en México en 1971 y se convertirán en propiedad permanente de la Universidad Nacional Autónoma de México al final del periodo de contratación de dos años.

Con esta red, será posible localizar y estudiar los temblores en la región del Golfo de California con una mejor eficacia de lo que ha sido posible antes. Por primera vez será posible localizar con exactitud los temblores en el área del Valle Imperial/Valle de Mexicali a causa de la presencia de estaciones sismográficas cooperativas a ambos lados de la frontera internacional.

PROBLEMAS SUGERIDOS POR ESTOS RESULTADOS PRELIMINARES

1) En detalle, ¿están los temblores de la región del Golfo alineados según fallas transformadas y segmentos de crestas, tan simple y precisamente como lo sugieren los estudios telesísmicos de ésta y otras regiones en base a estaciones mundiales? Ya está claro que fuera del área Golfo de California-Salton los epicentros de temblores describen un patrón más complejo de deformación que el de un sistema ideal de fallas transformadas y crestas oceánicas. ¿Es éste un efecto de la transición de propiedades mecánicas del océano al continente, o mostrarán los estudios sismológicos de áreas oceánicas más al sur del Golfo complejidades similares?

2) Los enjambres de temblores han sido conocidos por mucho tiempo como típicos de la región del Lago Salton, y las estaciones recientemente establecidas en México han proporcionado importantes datos sobre un enjambre de temblores de tipo oceánico que ocurrió en la parte norte

and solar panel and battery. These units are already under construction at the California Institute of Technology; they will be installed in Mexico in 1971 and will become the permanent property of the Universidad Nacional Autónoma de México at the end of the two-year grant period.

With this network, it will be possible to locate and to study earthquakes in the Gulf of California region with far greater effectiveness than has ever before been possible. And for the first time it will be possible accurately to locate earthquakes in the Mexicali Valley-Imperial Valley area because of the presence of cooperating seismographic stations on both sides of the international border.

PROBLEMS SUGGESTED BY THESE PRELIMINARY RESULTS

1) In detail, are the earthquakes of the Gulf region aligned along transform faults and ridge segments as simply and as precisely as has been suggested by teleseismic studies of this and other regions on the basis of world-wide stations? It is already clear that outside of the Gulf of California-Salton trough region earthquake epicenters outline a more complex pattern of deformation than that of the idealized ocean ridge-transform fault system. Is this an effect of the transition in mechanical properties from the ocean to the continent, or will detailed seismological studies of truly oceanic areas farther south in the Gulf show similar complexities?

2) Swarm-like earthquake sequences have long been known to be typical of the Salton Sea region, and the recently established stations in Mexico have yielded important data on a remarkable oceanic-type earthquake swarm that occurred in the northern Gulf of California.

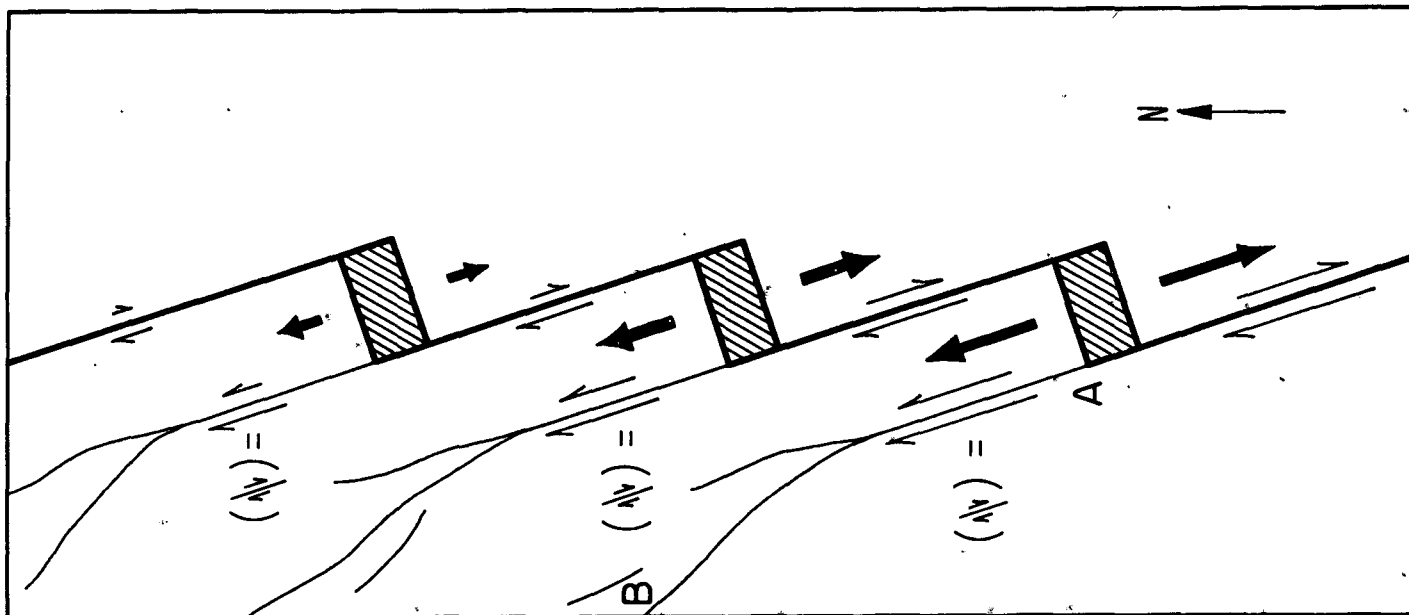


Fig. 4. Dibujo esquemático de posibles patrones de fallas resultantes de un decrecimiento progresivo de la velocidad de dispersión hacia el norte (flechas gruesas). Los paréntesis al lado izquierdo indican que los desplazamientos en relación a las fallas transformadas "prolongadas" (p. ej., A-B) son laterales-derechos (si se extendieran al este, la falla transformada "prolongada" sería lateral izquierda, y el patrón sería muy diferente al de la fosa Salton).

Fig. 4. Schematic drawing of possible fault pattern resulting from a progressive decrease in spreading rates northward (heavy arrows). Parentheses on left indicate that relative displacement on transform fault "extensions" (e.g., A-B) is right-lateral (if extended instead on east side, transform fault "extensions" would be left lateral, and the pattern would be very unlike that of the Salton trough.).

del Golfo de California en 1969. Las áreas de enjambres y de temblores normales ¿siguen las crestas y segmentos de fallas transformadas respectivamente, como se ha sugerido en otras partes? Los mecanismos focales ¿apoyan este punto de vista?

3) Suponiendo que los epicentros en la región del Golfo realmente delinean un sistema de fallas transformadas y crestas, ¿cómo se relaciona el patrón detallado con la geología visible? Los estudios preliminares de los centros volcánicos, fallas transcurrentes conocidas, y el flujo térmico en algunas partes de la región del delta sugieren un cuadro relativamente simple. ¿Puede este patrón ser usado en alguna forma para pronosticar la ocurrencia de campos geotérmicos de vapor?

4) ¿Qué se puede decir acerca de la sismicidad y del riesgo sísmico en la región del Golfo, región de la República Mexicana que está actualmente experimentando un desarrollo y una industrialización muy rápida?

5) ¿Cómo se relaciona la acumulación y liberación de tensiones en el Golfo de California oceánico a la ocurrencia de grandes temblores en el sistema de Fallas de San Andrés? ¿Hay diferencias significativas en los datos estadísticos de los temblores en las dos regiones?

6) ¿Cómo puede la sismicidad en las fallas individuales relacionarse a la presencia o ausencia del desplazamiento superficial lento en estas fallas? Algunas de las fallas en el área del delta muestran deslizamientos superficiales espasmódicos continuos, pero otros no lo muestran; las razones mecánicas para esto no son claras.

7) ¿Cómo se relacionan las velocidades de desplazamiento en fallas transformadas individuales, calculadas por su sismicidad, con las velocidades de desplazamiento en fallas transformadas adyacentes y en segmentos de crestas conectados? ¿Cuál es la profundidad de la parte donde se generan temblores en la corteza de estas áreas?

8) ¿Cómo se relaciona la estructura detallada de la corteza a través del Golfo y la transición de la corteza oceánica a la corteza continental a lo largo de él con la historia tectónica del Golfo?

9) Las tres estaciones establecidas recientemente en el extremo norte del Golfo han indicado que los tiempos de origen de los temblores en esta área se adelantan constantemente unos 2-4 segundos a los tiempos de origen dados por la USCGS basada en las estaciones mundiales. ¿Qué nos indica esto acerca de la estructura de la corteza local y del manto? ¿Cuán anómala es la curva del tiempo de recorrido para este sistema de cresta oceánica?

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de un estudio de la sismicidad y la tectónica en la parte norte del Golfo de California y en la fosa de Salton han indicado lo siguiente:

1) La sismicidad detallada durante un periodo representativo de abril y mayo de 1969 estuvo concentrada en las fallas de Imperial, San Jacinto, Sierra Juárez y San Miguel. La dispersión de epicentros determinados con la ayuda de tres nuevas estaciones sismográficas en la región es mucho menor que lo indicado previamente.

2) En marzo de 1969 un enjambre de temblores extraordinario fue localizado con precisión cerca de Roca Consag y en la cuenca de Wagner en la parte norte del Golfo, y su ubicación, mecanismo focal y relaciones a otros temblores fuertes cercanos indican que esta área es un centro de activa dispersión del fondo submarino.

3) La estructura tectónica de esta región puede describirse aproximadamente por un patrón relativamente

in 1969. Do the areas of swarm and normal earthquakes delineate ridge and transform fault segments, respectively, as has been suggested elsewhere? Do focal mechanisms support this viewpoint?

3) Assuming that epicenters in the Gulf region do indeed delineate an ocean ridge-transform fault system, how does the detailed pattern relate to the visible geology? Preliminary studies of the volcanic centers, known strike-slip faults, and heat-flow in some parts of the delta region suggest a relatively simple picture. Can this pattern be used in any way to predict the occurrences of geothermal steam areas?

4) What can be said about the seismicity and seismic hazard of the Gulf region — a part of the Republic of Mexico that is currently undergoing very rapid development and industrialization?

5) How is strain accumulation and release in the oceanic Gulf of California related to the occurrences of large earthquakes along the continental San Andreas fault system? Are there significant differences in the statistics of earthquake occurrences in the two regions?

6) How can the seismicity of individual faults be related to the presence or absence of surficial creep on these faults? Some of the faults in the delta area show continuing spasmodic surface slippage, but others do not; the mechanical reasons for this are not clear.

7) How are the rates of slip on individual transform faults, as estimated from seismicity, related to the rates of slip on adjacent transform faults and connecting ridge segments? How deep is the earthquake-producing part of the crust in these areas?

8) How do the detailed crustal structure across the Gulf and the transition from oceanic to continental crust along its length relate to the tectonic history of the Gulf?

9) The three recently established stations at the north end of the Gulf have indicated that the origin times of earthquakes in this area are consistently 2-4 seconds earlier than the origin times given by the USCGS based on world-wide stations. What does this tell us about the local crust and mantle structure? How anomalous is the travel-time curve for this oceanic ridge system?

CONCLUSIONS

Preliminary results of a study of the seismicity and tectonics of the northern Gulf of California and Salton trough have indicated:

1) Detailed seismicity during a representative period in April and May of 1969 was concentrated along the Imperial, San Jacinto, Sierra Juárez, and San Miguel faults. The scatter of epicenters determined with the aid of three new seismographic stations in the region is much less than previously indicated.

2) In March of 1969 a remarkable swarm of earthquakes was accurately located near Consag Rock and the Wagner basin in the northern Gulf, and their location, focal mechanism, and relationship to other nearby earthquakes strongly suggest that this area is an active spreading center.

3) The tectonic framework of this region can be approximated by a relatively simple pattern of six trans-

simple de seis fallas transformadas y cinco centros de dispersión caracterizados por áreas geotérmicas, actividad volcánica reciente, enjambres de temblores, y depresiones topográficas submarinas. Este simple patrón no explica la sismicidad y el patrón de fallas complejo al oeste de la fosa en la parte norte de Baja California y la California del Sur, pero éstas posiblemente estén relacionadas con una velocidad de dispersión decreciente hacia la parte norte del Golfo y la región del delta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado en parte por los contratos GA-715, 12868 y 21397 de la National Science Foundation de EE.UU. La cooperación de la CFE en Mexicali (Ing. V. Martínez Martel, Jefe) fue de gran importancia para establecer y operar las estaciones sismográficas.

form faults separated by five spreading centers evidenced by geothermal areas, recent volcanic activity, earthquake swarms, and submarine topographic depressions. The simple pattern does not explain the seismicity and complex fault pattern west of the trough in northern Baja California and southern California, but these may be related to progressively diminishing spreading rates northward in the Gulf and delta region.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported in part by U.S. National Science Foundation grants GA-715 (Heat Flow), GA-12868 (Earthquake Mechanisms) and GA-21397 (Gulf of California Seismographic Network). The assistance of the C.F.E. in Mexicali (Ing. V. Martínez Martel, Chief) was of great importance in establishing and operating the seismographic stations.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, C. R., P. ST. AMAND, C. F. RICHTER and J. N. NORDQUIST, 1965. Relationship between Seismicity and Geologic Structure in the Southern California Region: *Seismol. Soc. America Bull.*, v. 55, pp. 753-797.
- BRUNE, J. N. and C. LOMNITZ, 1969. Recent Seismological Studies of Northern Baja California, Mexico: *Assoc. Internat. Séismol. Phys. Intér. Terre, Comptes Rendus* 16, p. 66 (abstract only).
- CROWELL, J. C., 1962. Displacement on the San Andreas Fault, California: *Geol. Soc. America Spec. Paper* 71, 61 p.
- GRAY, C. H. JR., 1961. Geology of the Corona South Quadrangle and the Santa Ana Narrows Area: *California Div. Mines Bull.* 178, 120 p.
- ELDERS, W. A., T. MEIDAV, R. W. REX and P. T. ROBINSON, 1970. The Imperial Valley of California: The Product of Oceanic Spreading Centers Acting on a Continent (abstract): *Geol. Soc. America* abstracts with programs v. 2, p. 545.
- FISHER, R. L., G. A. RUSNAK and F. P. SHEPARD, 1964. Submarine Topography of the Gulf of California, chart in van T. H. Andel and G. G. Shor, Jr., Marine Geology of the Gulf of California; Am. Assoc. Petroleum Geologists. Mem. 3.
- LARSON, R. L., H. W. MENARD and S. M. SMITH, 1968. Gulf of California a Result of Ocean-floor Spreading and Transform Faulting: *Science*, v. 161, pp. 781-784.
- SHARP, R. V., 1967. San Jacinto Fault Zone in the Peninsular Ranges of Southern California: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 78, pp. 705-730.
- . 1968. The San Andreas Fault System and Contrasting pre-San Andreas Structures in the Peninsular Ranges of Southern California (abstract): *Stanford Univ. Pubs. Geol. Sci.*, v. 11, pp. 292-293.
- SYKES, L. R., 1968. Seismological Evidence for Transform Faults, Sea-floor Spreading and Continental Drift, in *The History of the Earth's Crust*, edited by R. A. Phinney, pp. 120-150, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.
- . 1970. Earthquake Swarms and Sea-floor Spreading: *Jour. Geophys. Res.*, v. 75, pp. 6598-6611.
- THATCHER, W. and J. N. BRUNE, 1969. Surface Waves and Crustal Structure in the Gulf of California, Baja California, and Sonora (abstract): *EOS*, v. 50, p. 240.
- . In press, Seismic Study of an Oceanic Ridge Earthquake Swarm in the Gulf of California: *Royal Astron. Soc. Geophys. Jour.*
- WYSS, M., 1970. Apparent Stresses of Earthquakes on Ridges Compared to Apparent Stresses of Earthquakes in Trenches: *Royal Astron. Soc. Geophys. Jour.*, v. 18, pp. 479-484.

BIBLIOGRAPHY